Technischer Bericht H 59

**Thema:** Angenäherte Berechnung der Verluste im Widerstand eines Dämpfungsgliedes bei Bedämpfung der Graetzschaltung mit drei RC-Elementen parallel zu den drei Hochspannungstransformatorwicklungen.

Anzahl der Textblätter: 30

Anzahl der Beilagen: 17

Anzahl der Fotos:

Verfasser: Dr.Grünwald
Dr.Schiele

Datum: 1.August 1949

Kurze Inhaltsangabe:

Um in der Graetzschaltung die Verlustleistung im Widerstand von RC-Dämpfungskreisen, welche parallel zu den drei Transformatorphasen liegen, zu berechnen, wird die Transformatorspannung mit ihren Einbrüchen, welche durch die Kommutierung verursacht werden, untersucht. Hieraus wird die Leistung ermittelt. Bei der Dimensionierung der 3 Dämpfungskreise mit je 50 000 pF und 4 000 Ohm wird diese Verlustleistung für die Originalanlage Elbe-Berlin bei einem Steuerwinkel von $\alpha = 30^0$ zu 108 kW und bei einem Steuerwinkel von $90^0$ zu ca.300 kW näherungsweise betragen.

25X1A

[redacted]

Geschrieben: Durchsicht: Verfasser

# Inhaltsverzeichnis.

# Bilderverzeichnis.





Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010003-4

Bild 15: Transformatorspannung $s(x)$

Bild 16: Mittelwert der Leistung

Bild 17: Kondensatorspannung $v(x)$
und Transformatorspannung $s(x)$

**Angenäherte Berechnung der Verluste im Widerstand eines Dämpfungsgliedes bei Bedämpfung der Graetzschaltung mit 3 RC-Elementen parallel zu den 3 Hochspannungs-Transformatorwicklungen.**

Einleitung:

Im Technischen Bericht H 58 wurde die Bedämpfung der Graetzschaltung durch 3 RC-Elemente parallel zu den drei Hochspannungs-Transformatorwicklungen angegeben. Um die Verluste im Widerstand eines Dämpfungsgliedes entsprechend der Genauigkeit der Entwicklung der Dämpfungsglieder zu berechnen, wäre es notwendig, die Schaltvorgänge beim Zünden (Kommutieren) und Löschen zugehörig zum geerdeten und ungeerdeten Gleichstrompol auszuwerten. Die unbedämpfte Graetzschaltung stellt ein Netzwerk dar mit einer charakteristischen Gleichung 2 x 3 = 6-ten Grades, die infolge des Fehlens ohmscher Widerstände zu einer Gleichung 3-ten Grades zusammenschrumpft. Die bedämpfte Graetzschaltung ergibt dagegen entsprechend den 3 hinzutretenden mit Widerständen ausgerüsteten Dämpfungsgliedern eine charakteristische Gleichung mindestens 6-ten Grades, was eine ganz erhebliche Vergrößerung des rechnerischen Aufwandes bedeutet.

Es wird deshalb nachstehend eine Abschätzung vorgenommen, die von dem Verlauf der 3 Transformatorspannungen ausgeht, an denen die 3 RC-Glieder liegen. Dieser Verlauf wird in Anlehnung an die Eigenfrequenzen der unbedämpften Graetzschaltung angenommen, wodurch eine gewisse Sicherheit in der Leistungs-Dimensionierung der Widerstände gegeben ist. Die Steilheiten der Spannungseinbrüche beim Zünden (Kommutieren) werden nach der ersten Oberwelle der jeweiligen Zündfrequenz, die Steilheiten der wiederkehrenden Spannung nach Grund- bzw. erster Oberwelle der Löschschwingungen beurteilt, je nachdem es sich um einen Schaltvorgang am ungeerdeten oder geerdeten Gleichstrompol handelt.

SECRET

## 1. Der Spannungsverlauf an der Hochspannungswicklung einer Transformatorphase.

Wird der Einfluß der Kapazitäten bei der Betrachtung des Spannungsverlaufes an einer Hochspannungswicklung außer Acht gelassen, so gelten die in Bild 1 und 2 dargestellten Verhältnisse. Der im wesentlichen sinusförmige Verlauf der Phasenspannung $u = U\sqrt{2}\,\sin(\omega t + 30^\circ)$ geht während der Kommutierung (Winkel $\beta$) am hochspannungsseitigen (Stellen h) bezw. geerdeten Gleichstrompol (Stellen e) in die Spannungen $\frac{u+w}{2}$ und $\frac{u+v}{2}$ über. Für die Zündwinkel $\alpha_1 = 30^\circ$ sind die Spannungsänderungen beim Kommutieren voll ausgezogen, für $\alpha_1 = 60^\circ$ strichliert gezeichnet in Bild 1, der Höchstwert der Spannungseinbrüche wird bei $\alpha = 90^\circ$ (Bild 2) erreicht.
Die Einbrüche liegen abwechselnd $120^\circ$ und $60^\circ$ auseinander. Die Errechnung der Verluste im Widerstand des RC-Dämpfungsgliedes mit diesen plötzlichen Spannungseinbrüchen würde zu einer starken Überschätzung der Verluste führen.

Tatsächlich wird die Steilheit der Einbrüche durch die infolge der Kapazitäten auftretenden Einschwingvorgänge herabgesetzt. Bild 3 links zeigt bei nur schwacher durch den Modellaufbau gegebener Dämpfung den Verlauf von u mit den Einbrüchen bei $e_I$, $h_{II}$, $h_{III}$, $z_{IV}$, die in der Mitte bezw. im Bild rechts zeitgedehnt wiedergegeben sind. Der Anstieg der wiederkehrenden Spannung beim Löschen L ist relativ langsam, er entspricht beim Löschen eines Gefäßes am geerdeten Gleichstrompol (Index e) der Grundfrequenz der Löschschwingung, beim Löschen eines Gefäßes am nicht geerdeten Gleichstrom-Hochspannungspol (Index h) der ersten Oberwelle der Löschfrequenz. Die Einbrüche der Zündschwingungen Z sind steiler. Die Amplitude der Zündgrundfrequenz ist im ersten Moment des Spannungseinbruchs völlig unmaßgeblich, gleichgültig ob der Zündvorgang am geerdeten (Index e) oder ungeerdeten (Index h) Gleichstrompol vor sich geht. Die tiefste auftretende Frequenz ist die erste Oberwelle und Schwingungen höherer Ordnung. Die verschieden großen Steilheiten der Zündschwingungen Z wechseln andere als die Steilheiten von L ab und richten sich danach, ob der Übergang von u in $\frac{u+w}{2}$ oder $\frac{u+v}{2}$ erfolgt.

Die bedämpfte Graetzschaltung hat noch weichere Spannungseinbrüche ($u$ in Bild 4, voll ausgezogene Kurven). Im Bild 4 ist weiter der Verlauf der Spannung $u_c$ am Kondensator des RC-Dämpfungsgliedes eingetragen. Während für den 50-Hertz-Verlauf $u$ und $u_c$ sich praktisch decken, macht die Spannung $u_c$ am Kondensator die Spannungseinbrüche nicht ganz mit.

Infolge der großen Steilheit der Spannungseinbrüche beim Zünden fallen die zugehörigen Verlustanteile am meisten ins Gewicht. Das verminderte Einbrechen der Spannung $u_c$ am Kondensator des Dämpfungsgliedes und die geringe Steilheit der Löschschwingungen ergeben kleinere Verlustanteile. Dies ist auch aus dem Verlauf des Stromes $i$ durch das RC-Glied (Bild 5) zu erkennen. In Bild 5 links ist auch noch deutlich die 50-periodige Stromkomponente zu erkennen. Die zugehörigen Steilheiten der 50-Hertz-Spannung sind zwar klein, aber ihre Dauer groß im Vergleich zu den kurzen Spannungseinbrüchen, so daß der dazu gehörende Verlustanteil nicht einfach außer Acht gelassen werden kann.

Auf Grund dieser Darlegungen wird für die Berechnung der Verluste im Widerstand eines Dämpfungsgliedes der Graetzschaltung, die durch drei parallel zu den drei Hochspannungswicklungen liegende RC-Glieder nach Bericht H 58 bedämpft wird, der in Bild 6 wiedergegebene Spannungsverlauf verwendet.

Bei der Berechnung der Verluste werden innerhalb einer Periode 8 Intervalle unterschieden:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Intervall | 1, | Zeitachse | $\omega t_1$, | von $\omega t$ | $=\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ bis | $\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ |
| " | 2, | " | $\omega t_2$, | " " | $=\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ " | $\frac{2\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ |
| " | 3, | " | $\omega t_3$, | " " | $=\frac{2\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ " | $\frac{2\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ |
| " | 4, | " | $\omega t_4$, | " " | $=\frac{2\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ " | $\frac{4\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ |
| " | 5, | " | $\omega t_5$, | " " | $=\frac{4\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ " | $\frac{4\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ |
| " | 6, | " | $\omega t_6$, | " " | $=\frac{4\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ " | $\frac{5\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ |
| " | 7, | " | $\omega t_7$, | " | $=\frac{5\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ " | $\frac{5\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ |
| " | 8, | " | $\omega t_8$, | " " | $=\frac{5\pi}{3}+\frac{\beta}{2}$ " | $2\pi+\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}$ |

Zu Beginn eines jeden Intervalles ist die Steilheit der Spannungsänderung nicht unendlich groß, sondern endlich. Sie wird angepaßt der zugehörigen dominierenden Schwingung des betreffenden Schaltvorganges der ungedämpften Graetzschaltung, was im Sinne einer Überschätzung der Verluste liegt; dafür werden von den Frequenzen des Schaltvorganges nur die Grund-und die erste Oberschwingung nach Bericht H 58 in Betracht gezogen. Der Spannungssprung wird durch eine e-Funktion dargestellt mit einer Zeitkonstanten, ausgedrückt durch einen Winkel $\omega t = \Delta$ ( $= \Gamma, \gamma, \Lambda, \lambda$ in Bild 6)

$$\Delta = \frac{f}{f_I} \qquad 1a)$$

wenn f = 50 Hz ist und fi die Frequenz der dominierenden Schwingung ist.

Zu Anfang des 1., 3., 5. und 7. Zeitintervalles beginnt der Zünd-(Kommutierungs)-Vorgang. Für genauere Betrachtungen sollte $\Delta = \Gamma$ und $\Delta = \gamma$ ( $\gamma < \Gamma$ ) abwechselnd aufeinander folgen. Gemäß dem vorher Gesagten wird gesetzt

$$\Gamma = \gamma = \frac{f}{f_{z1}} \qquad 1b)$$

$f_{z1}$ ist die erste Oberwelle der Zündschwingung.

Zu Anfang des 2., 4., 6. und 8. Zeitintervalles beginnt der Löschvorgang. Je nachdem, ob es sich um das Löschen eines Gefäßes am geerdeten oder ungeerdeten Gleichstrompol handelt, ist $\Delta = \Lambda$ oder $\Delta = \lambda$

$$\Lambda = \frac{f}{f_{L0}} \qquad 1c)$$

$$\lambda = \frac{f}{f_{L1}} \qquad 1d)$$

Es folgen abwechselnd aufeinander

$$\lambda\lambda, \Lambda, \Lambda, \lambda\lambda, \Lambda\,\Lambda, \ldots$$

## 2. Berechnung der Frequenzen fi.

Im Technischen Bericht H 58 ist die Berechnung der Löschfrequenzen $f_L$ der ungedämpften Graetzschaltung angegeben. Die Kapazitäten $C_i'$ der Graetzschaltung werden mit Hilfe einer willkürlich gewählten

Bezugskapazität C

als bezogene Kapazitäten $c_i = \frac{C_i}{C}$ geschrieben. Aus der Gleichung

$$\begin{aligned} & x^3 + x^2 \left[2\,(c_2+c_3+c_4) + c_5+c_6+c_7\right] + \\ & + x\left[3\,(c_2c_3+c_2c_4+c_3c_4) + (c_2+c_3)(c_5+c_6)+(c_2+c_4)(c_5+c_7) + \right. \\ & \left. + (c_3+c_4)(c_6+c_7)+ c_5c_6 + c_5c_7 + c_6c_7\right] \\ & + (c_2c_3+c_2c_4+c_3c_4)(c_5+c_6+c_7)+(c_2+c_3)c_5c_6+(c_2+c_4)c_5c_7 + \\ & + (c_3+c_4)\,c_6c_7 + c_5c_6c_7 = 0 \end{aligned} \qquad (2a)$$

werden die Eigenwerte $x_{L1}$, $x_{L2}$, $x_{L3}$ ( $x_{L1} > x_{L2} > x_{L3}$) ~~errechnet.~~ 2a)

errechnet. Die gesuchten Löschfrequenzen sind dann (mit L = Transformatorstreuinduktivität, C = Bezugsfrequenz):

Die Grundfrequenz

$$f_{L0} = \frac{1}{\sqrt{x_{L1}}\; 2\pi \sqrt{LC}} \qquad 2b)$$

die 1.Oberwelle

$$f_{L1} = \frac{1}{\sqrt{x_{L2}}\; 2\pi \sqrt{LC}} \qquad 2c)$$

Die Zünd-(Kommutierungs)-Frequenzen erhält man aus Gl.2a, indem man $c_2$ bezw. $c_4$ gleich $\infty$ setzt.

$c_2 = \infty$ (Kommutierende Gefäße am geerdeten Gleichstrompol)

liefert die Gleichung

$$x^2 + x\left[\frac{3}{2}\,(c_3+c_4) + c_5 + \frac{1}{2}\,(c_6+c_7)\right] + \frac{1}{2}\left[(c_3+c_4)(c_5+c_6+c_7) + c_5(c_6+c_7)\right] = 0 \qquad 3a)$$

$c_4 = \infty$ (Kommutierende Gefäße am ungeerdeten Gleichstrompol)

liefert die Gleichung

$$x^2 + x\left[\frac{3}{2}(c_2+c_3)+\frac{1}{2}(c_5+c_6)+c_7\right]+\frac{1}{2}\left[(c_2+c_3)(c_5+c_6+c_7)+(c_5+c_6)\,c_7\right]=0 \qquad 3b)$$

Von den Eigenwerten x, welche die Gleichungen 3a und 3b ergeben, wird der kleinste genommen (entsprechend der höherfrequenten ersten Oberschwingung der Zündfrequenzen) er $x_{z1}$

Es ist dann

$$f_{z1} = \frac{1}{\sqrt{x_{z1}}\;2\pi\sqrt{LC}} \qquad 3c)$$

## 3. Die Theorie der Verlustrechnung.

Der Errechnung der Verluste wird der gegen Ende des ersten Abschnittes beschriebene Verlauf der Transformator-Klemmenspannung einer Hochspannungsphase nach Bild 6 zu Grunde gelegt. Er wurde ausgesucht mit Rücksicht auf eine möglichst einfache Gestaltung der Formel für die Verluste, nachdem vorher eine Reihe andere Verlaufsformen durchgerechnet wurden, wie z.B. trapezförmige Einbrüche mit den gleichen Anfangssteilheiten der Spannungsänderungen wie in Bild 6. Schließlich hat es sich gezeigt, daß auch bei der Verwendung des Verlaufs nach Bild 6 noch Vereinfachungen angängig sind mit Rücksicht darauf, daß der Einbruchswinkel $\beta$ ein kleiner Winkel ist und daß weiter die Zeitkonstante RC des RC-Dämpfungsgliedes klein ist gegen $(\frac{\pi}{3}-\beta)$; es können dann zu Beginn des 1., 3., 5. und 7-ten Intervalles Klemmenspannung der Transformatorphase und Spannung am Kondensator des RC-Gliedes gleich groß gesetzt werden.

In Bild 7 ist das RC-Dämpfungsglied gezeichnet. Mit den Bezeichnungen u für die nach Bild 6 vorgegebene Transformatorspannung und $u_c$ für die Spannung am Kondensator C des Dämpfungsgliedes mit dem Dämpfungswiderstand R gilt die Differentialgleichung zur Bestimmung von $u_c$:

$$u_c + R.C\,\frac{du_c}{dt} = u$$

Kürzt man ab

$$\rho = R\omega C \qquad 4a)$$
$$x = \omega t \qquad 4b)$$

so kann man die Differentialgleichung schreiben in der Form

$$u_c + \rho \frac{du_c}{dx} = u \qquad 4c)$$

Den Strom i durch das Dämpfungsglied findet man aus

$$i = C \frac{du_c}{dt}$$

oder:

$$i = \frac{1}{R} \rho \frac{du_c}{dx} \qquad 4d)$$

Die gesuchte Verlustleistung ist dann

$$P = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{t=\frac{2\pi}{\omega}} R i^2 dt$$

oder

$$P = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R} \cdot \rho^2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{x=2\pi} \left(\frac{dv}{dx}\right)^2 dx \qquad 5a)$$

mit

$$v = \frac{u_c}{U\sqrt{2}} \qquad 5b)$$

Wären die Einbrüche nicht vorhanden, so wäre $u = U\sqrt{2}\sin x$ und mit $u_c \approx u$ wäre $v = \sin x$. Für die zugehörige Verlustleistung ist dann $\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \sin^2 x \, dx = \frac{1}{2}$. Die Verlustleistung

$$P_{s0} = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R} \rho^2 \cdot \frac{1}{2} \qquad 6a)$$

soll als erster Verlustanteil beibehalten werden, auch wenn die Spannungseinbrüche vorhanden sind; die Überschätzung ist gering, da das

Maximum des Verluststromes $i_{50}$ (Bild 6) in die breite Zone zwischen den Einbrüchen zu liegen kommt.

Es sind nun die Verluste zu rechnen, die durch die Spannungs-Einbrüche bedingt sind. Der Einfachheit halber wird so gerechnet, als ob die Spannungseinbrüche von einer konstanten Spannung vom Betrag $S = U\sqrt{2}\sin\frac{\pi}{3} = U\sqrt{2}\cdot\frac{1}{2}\sqrt{3}$ (Bild 6) aus erfolgen würden. In Bild 8 und 9 sind beide zu einem Einbruch gehörige Spannungsänderungen gezeichnet.

<u>Zünden</u> (Bild 8)

$$u = S e^{-\frac{x}{\Gamma}} \qquad 7a)$$

Führt man Gl.7a in Gl.4c ein, so erhält man als Lösung der Differentialgleichung (mit der Anfangsbedingung $u_c$ für $x = 0$ gleich S) $u_c$ zusammengesetzt aus 2 Gliedern, die der homogenen Gleichung bezw. dem Störungsglied angepaßt sind.

$$u_c = \frac{S}{\rho-\Gamma}\left(\rho e^{-\frac{x}{\rho}} - \Gamma e^{-\frac{x}{\Gamma}}\right) \qquad 7b)$$

Sie geht für $\rho = \Gamma$ über in

$$u_C = S\left(1+\frac{x}{\rho}\right)e^{-\frac{x}{\rho}} \qquad 7c)$$

Aus Gl.7b (und Gl.5b) folgt

$$\frac{dv}{dx} = \frac{S}{U\sqrt{2}}\,\frac{1}{\rho-\Gamma}\left(-e^{-\frac{x}{\rho}} + e^{-\frac{x}{\Gamma}}\right) \qquad 7d)$$

Wertet man damit das Integral nach Gl.5a aus, wobei für dieses Intervall 1 das Integral von 0 bis $\beta$ zu erstrecken ist, so erhält man für den Verlustleistungsanteil im <u>Intervall 1</u>

$$P_1 = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R}\rho\,\frac{1}{2}\cdot\frac{3}{8\pi}\left[\frac{\rho}{\rho+\Gamma} - \left(\frac{\rho}{\rho-\Gamma}\right)^2\left(e^{-\frac{2\beta}{\rho}} + \frac{\Gamma}{\rho}e^{-\frac{2\beta}{\Gamma}} - 4\frac{\Gamma}{\rho+\Gamma}e^{-\beta\frac{\rho+\Gamma}{\rho\Gamma}}\right)\right] \qquad 8a)$$

SECRET

bezw. für $\varrho = \Gamma$

$$P_1 = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R}\,\varrho\,\frac{1}{2}\cdot\frac{3}{8\pi}\left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\left(1+\frac{2\beta}{\varrho}+\frac{1}{2}\left(\frac{2\beta}{\varrho}\right)^2\right)e^{-\frac{2\beta}{\varrho}}\right] \qquad 8b)$$

<u>Löschen</u> (Bild 9) $\qquad \Gamma < \beta;\ \Lambda < \frac{\pi}{3} - \beta$

$$u = S\left(1 - e^{-\frac{x}{\Lambda}}\right) \qquad 9a)$$

Führt man Gl.9a in Gl.4c ein, so hat man die Differentialgleichung zur Bestimmung von $u_c$ im Intervall 2. Die Anfangsbedingung ist nach Gl.7b:

$$u_c \text{ für } x=0 = u_{c0} = \frac{S}{\varrho-\Gamma}\left(\varrho e^{-\frac{\beta}{\varrho}} - \Gamma e^{-\frac{\beta}{\Gamma}}\right) \qquad 9b)$$

Ist $\varrho = \Gamma$, so ist nach Gl. 7c

$$u_{c0} = S\left(1+\frac{\beta}{\varrho}\right)e^{-\frac{\beta}{\varrho}} \qquad 9c)$$

Für $u_c$ folgt:

$$u_c = S + \left(u_{c0} - S\frac{\varrho}{\varrho-\Lambda}\right)e^{-\frac{x}{\varrho}} + S\frac{\Lambda}{\varrho-\Lambda}e^{-\frac{x}{\Lambda}} \qquad 9d)$$

Ist $\varrho = \Lambda$, so gilt:

$$u_c = S + \left[u_{c0} - S\left(1+\frac{x}{\varrho}\right)\right]e^{-\frac{x}{\varrho}} \qquad 9e)$$

Aus Gl.9d (und Gl.5b) folgt:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{S}{U\sqrt{2}}\,\frac{1}{\rho-\Lambda}\left[\left(1-\frac{u_{co}}{S}\,\frac{\rho-\Lambda}{\rho}\right)e^{-\frac{x}{\rho}}-e^{-\frac{x}{\Lambda}}\right] \qquad 9f)$$

Wertet man damit das Integral nach Gl.5a aus, wobei für dieses Intervall 2 das Integral von o bis $\infty$ zu erstrecken ist, so erhält man für den Verlustleistungsanteil im <u>Intervall 2</u>

$$P_2 = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R}\,\rho\,\frac{1}{2}\cdot\frac{3}{8\pi}\left[\frac{\rho}{\rho+\Lambda}+\left(\frac{u_{co}}{S}\right)^2-2\,\frac{u_{co}}{S}\,\frac{\rho}{\rho+\Lambda}\right] \qquad 10a)$$

mit 9b):

$$\frac{u_{co}}{S} = \frac{1}{\rho-\Gamma}\left(\rho e^{-\frac{\beta}{\rho}}-\Gamma e^{-\frac{\beta}{\Gamma}}\right) \qquad 10b)$$

bezw. für $\rho = \Gamma$

$$P_2 = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R}\,\rho\,\frac{1}{2}\cdot\frac{3}{8\pi}\left[\frac{1}{2}+\left(\frac{u_{co}}{S}\right)^2-\frac{u_{co}}{S}\right] \qquad 10c)$$

mit 9c):

$$\frac{u_{co}}{S} = \left(1+\frac{\beta}{\rho}\right)e^{-\frac{\beta}{\rho}} \qquad 10d)$$

Bei den 3 noch folgenden Einbrüchen während einer Periode gelten die Gleichungen 8 und 10, wenn man in ihnen entsprechend Bild 6 passend $\Gamma$ durch $\gamma$ bzw. $\Lambda$ durch $\lambda$ ersetzt. Man kann so alle Verlustleistungsanteile $P_{50}$ und $P_1$ bis $P_8$ zusammensetzen und erhält für die gesamte Verlustleistung im Dämpfungswiderstand:

$$
\begin{aligned}
P = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R}\,\frac{\rho}{2}\cdot\Big\{\frac{3}{8\pi}\Big[& 2\frac{\rho}{\rho+\Gamma} - 2\Phi(\Gamma) \\
&+ 2\frac{\rho}{\rho+\gamma} - 2\Phi(\gamma) \\
&+ \frac{\rho}{\rho+\Lambda} + \varphi^2(\Gamma) - 2\frac{\rho}{\rho+\Lambda}\,\varphi(\Gamma) \\
&+ \frac{\rho}{\rho+\Lambda} + \varphi^2(\gamma) - 2\frac{\rho}{\rho+\Lambda}\,\varphi(\gamma) \\
&+ \frac{\rho}{\rho+\lambda} + \varphi^2(\Gamma) - 2\frac{\rho}{\rho+\lambda}\,\varphi(\Gamma) \\
&+ \frac{\rho}{\rho+\lambda} + \varphi^2(\gamma) - 2\frac{\rho}{\rho+\lambda}\,\varphi(\gamma)\Big] + \rho\Big\}
\end{aligned}
\tag{11a}
$$

$$
\Phi(\Gamma) = \left(\frac{\rho}{\rho-\Gamma}\right)^2\left(e^{-2\frac{\beta}{\rho}} + \frac{\Gamma}{\rho}\,e^{-2\frac{\beta}{\Gamma}} - 4\frac{\Gamma}{\rho+\Gamma}\,e^{-\beta\frac{\rho+\Gamma}{\rho\cdot\Gamma}}\right) \tag{11b}
$$

bei $\rho = \Gamma$ ist

$$
\Phi(\rho=\Gamma) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2\beta}{\rho} + \frac{1}{2}\left(\frac{2\beta}{\rho}\right)^2\right)e^{-\frac{2\beta}{\rho}}
$$

$$
\Phi(\gamma) = \left(\frac{\rho}{\rho-\gamma}\right)^2\left(e^{-\frac{2\beta}{\rho}} + \frac{\gamma}{\rho}\,e^{-\frac{2\beta}{\gamma}} - 4\frac{\gamma}{\rho+\gamma}\,e^{-\beta\frac{\rho+\gamma}{\rho\cdot\gamma}}\right) \tag{11c}
$$

bei $\rho = \gamma$ ist

$$
\Phi(\rho=\gamma) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2\beta}{\rho} + \frac{1}{2}\left(\frac{2\beta}{\rho}\right)^2\right)e^{-\frac{2\beta}{\rho}} = \Phi(\rho=\Gamma)
$$

$$
\varphi(\Gamma) = \frac{1}{\rho-\Gamma}\left(\rho\,e^{-\frac{\beta}{\rho}} - \Gamma\,e^{-\frac{\beta}{\Gamma}}\right) \tag{11d}
$$

bei $\rho = \Gamma$ ist

$$
\varphi(\rho=\Gamma) = \left(1 + \frac{\beta}{\rho}\right)e^{-\frac{\beta}{\rho}} \tag{11e}
$$

$$
\varphi(\gamma) = \frac{1}{\rho-\gamma}\left(\rho\,e^{-\frac{\beta}{\rho}} - \gamma\,e^{-\frac{\beta}{\gamma}}\right)
$$

bei $\rho = \gamma$ ist

$$
\varphi(\rho=\gamma) = \left(1 + \frac{\beta}{\rho}\right)e^{-\frac{\beta}{\rho}} = \varphi(\rho=\Gamma)
$$

Da im betrachteten Fall, wie im Text vor Gl. 1b angegeben, nach Gl. 1b $\Gamma = \gamma$ angenommen wird, so kann man für die <u>Verlustleistung P</u> schreiben:

$$P = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R}\,\frac{\rho}{2}\cdot\Big\{\frac{3}{2\pi}\Big[\frac{\rho}{\rho+\gamma} - \phi(\Gamma) + \frac{1}{2}\Big(\frac{\rho}{\rho+\lambda}+\frac{\rho}{\rho+\Lambda}\Big) + \mathcal{S}^2(\gamma) - \Big(\frac{\rho}{\rho+\lambda}+\frac{\rho}{\rho+\Lambda}\Big)\mathcal{S}(\gamma)\Big] + \rho\Big\} \qquad (12a)$$

$$\phi(\Gamma) = \Big(\frac{\rho}{\rho-\gamma}\Big)^2\Big(e^{-\frac{2\beta}{\rho}} + \frac{\gamma}{\rho}\,e^{-\frac{2\beta}{\gamma}} - 4\frac{\gamma}{\rho+\gamma}\,e^{-\frac{2\beta}{\rho}\,\frac{\rho+\gamma}{2\gamma}}\Big) \qquad (12b)$$

bzw. (bei $\rho = \gamma$) ist

$$\phi(\rho=\gamma) = \frac{1}{2}\Big(1+\frac{2\beta}{\rho}+\frac{1}{2}\Big(\frac{2\beta}{\rho}\Big)^2\Big)e^{-\frac{2\beta}{\rho}}$$

$$\mathcal{S}(\gamma) = \frac{1}{\rho-\gamma}\Big(\rho e^{-\frac{\beta}{\rho}} - \gamma e^{-\frac{\beta}{\gamma}}\Big) \qquad (12c)$$

bzw. (bei $\rho = \gamma$) ist

$$\mathcal{S}(\rho=\gamma) = \Big(1+\frac{\beta}{\rho}\Big)e^{-\frac{\beta}{\rho}}$$

Im Spezialfall $\gamma = \Gamma = \lambda = \Lambda = 0$ wird

$$P = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R}\,\frac{\rho}{2}\cdot\Big[\frac{3}{\pi}\Big(1-e^{-\frac{\beta}{\rho}}\Big)+\rho\Big] \qquad (12d)$$

Für diesen Spezialfall werden die Verluste ermittelt, wobei $\beta = \varrho$ gesetzt wird.

$$\frac{P}{(U\sqrt{2})^2/R} = \frac{\varrho}{2}\left[\frac{3}{\pi}\left(1-\frac{1}{e}\right)+\varrho\right]$$

Es ergibt sich **Tabelle 1**: Verlustleistung P für veränderliches $\beta = \varrho$

| $\beta = \varrho$ | $4^\circ$ | $10^\circ$ | $20^\circ$ | $30^\circ$ |
|---|---|---|---|---|
| $\frac{P}{(U\sqrt{2})^2/R}$ | 0,0235 | 0,068 | 0,166 | 0,295 |

Diese Tabelle wurde zusammengestellt, um einen Vergleich mit demselben auf andere Weise abgeleiteten Fall für $\gamma = \Gamma = \lambda = \Lambda = 0$ zu erhalten, wie weiter unten in Abschnitt 6 gezeigt werden wird.

## 4. Praktische Werte der Verlustrechnung bei einem Steuerwinkel $\alpha = 90^\circ$.

Um eine Abschätzung der Verluste der Originalanlage Elbe-Berlin zu erhalten, wurden für eine bestimmte Bedämpfung der Graetzschaltung der Modellanlage nach Bild 10 die interessierenden elektrischen Grössen ermittelt. Die Gleichspannung wurde über die Glättungsdrossel von 4 $H$ kurz-geschlossen.

Die Dämpfungskreise bestehen aus 3 zu den Transformatorwicklungen parallel geschalteten RC-Kreisen mit einer Kapazität von 50 000 pF und einem Widerstand von 4 000 $\Omega$. Die bei dieser Bedämpfung auftretende Transformatorspannung ist in Bild 11 dargestellt; die Spannungseinbrüche A, B, C und D sind in Bild 12 zeitlich auseinandergezogen gezeichnet. Die dem Bild 6 entsprechenden Winkel betragen:

$$\left.\begin{aligned} \Gamma &= 0{,}23^\circ \;\hat{=}\; 0{,}004 \\ \Lambda &= 1{,}5^\circ \;\hat{=}\; 0{,}026 \\ \gamma &= 0{,}5^\circ \;\hat{=}\; 0{,}009 \\ \lambda &= 1{,}6^\circ \;\hat{=}\; 0{,}028 \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

Diese Werte gelten für einen Gleichstrom von 1,5 A und einen Steuerwinkel $\alpha = 90^\circ$. Da die Modellanlage entsprechend der Originalanlage

für den 100. Teil der Spannung und des Stromes ausgelegt worden ist, und sich Impedanzen und elektrische Winkel formgetreu abbilden, können wir die Werte für die Originalanlage entnehmen. Der Effektivwert der Transformatorspannung beträgt 98 kV. Zur Kontrolle des Einbruchswinkels $\beta$ wird der Überlappungswinkel u bestimmt. Dieser wird, da die Kurzschlußspannung $u_k$ = 0,11 ist, aus der Gleichung

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + u) = \frac{1}{\sqrt{2}}\, u_K$$

für $\alpha$ = 90° bestimmt und beträgt: u = $4°\,30'$

Allgemein beträgt der Überlappungswinkel u in Abhängigkeit vom Steuerwinkel $\alpha$ in Tabelle 2 : Überlappungswinkel u in Abhängigkeit vom Steuerwinkel $\alpha$ (Bild 13)

| $\alpha°$ | $u°$ |
|---|---|
| 0 | 22°40' |
| 30 | 8° |
| 45 | 6° |
| 60 | 5° |
| 90 | 4°30' |

Die Messung aus Bild 11 ergab einen Winkel $\beta$ von 7° zwischen den Punkten A, B und $\beta$ von 5° zwischen den Punkten C, D. Er wird im Mittel zu

$$\beta = 6° \;\hat{=}\; 0{,}105 \qquad (14)$$

angenommen, also etwas größer als die Überlappung u. Der Wert $\varrho$ ergibt sich aus den elektrischen Daten der Dämpfungskreise zu

$$\varrho = R \cdot \omega C = 4000 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 50000 \cdot 10^{-12}$$
$$= 0{,}0628 \qquad \hat{=}\; 3{,}6° \qquad (15)$$

Dann wird näherungsweise für den Spezialfall $\gamma = \Gamma = \lambda = \Lambda = 0$ aus Gleichung 12 d die Verlustleistung pro Phase:

$$P = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R} \cdot \frac{\varrho}{2}\left[\frac{3}{\pi}\left(1 - e^{-\frac{\beta}{\varrho}}\right) + \varrho\right]$$
$$= \frac{(98000 \cdot \sqrt{2})^2}{4000} \cdot \frac{0{,}0628}{2}\left[\frac{3}{\pi}\left(1 - e^{-\frac{6{,}0}{3{,}6}}\right) + 0{,}0628\right] \qquad (16)$$

$$= 126 \text{ kW}$$

Die genaue Ausrechnung nach Formel 11a) mit Berücksichtigung des Aussehens der Spannungseinbrüche liefert mit den Werten aus den Gleichungen 13), 14), 15):

$$P = \frac{(98\,000 \cdot \sqrt{2})^2}{4\,000} \cdot \frac{0{,}0628}{2} \biggl\{ \frac{3}{8\pi} \biggl[ 2 \, \frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}004}$$

$$- 2\biggl(\frac{0{,}0628}{0{,}0628-0{,}004}\biggr)^2 \biggl( e^{-\frac{2 \cdot 0{,}105}{0{,}0628}} + \frac{0{,}004}{0{,}0628} \cdot e^{-\frac{2 \cdot 0{,}105}{0{,}004}}$$

$$- 4 \, \frac{0{,}004}{0{,}0628 + 0{,}004} \cdot e^{-0{,}105 \cdot \frac{0{,}0628 + 0{,}004}{0{,}0628 \cdot 0{,}004}} \biggr)$$

$$+ 2 \, \frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}009} - 2 \biggl(\frac{0{,}0628}{0{,}0628-0{,}009}\biggr)^2 \biggl( e^{-\frac{2 \cdot 0{,}105}{0{,}0628}}$$

$$+ \frac{0{,}009}{0{,}0628} \, e^{-\frac{2 \cdot 0{,}105}{0{,}009}} - 4 \, \frac{0{,}009}{0{,}0628 + 0{,}009} \cdot e^{-0{,}105 \frac{0{,}0628+0{,}009}{0{,}0628 \cdot 0{,}009}} \biggr)$$

$$+ 2 \, \frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}026} + 2 \cdot \frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}028}$$

$$+ 2\biggl(\frac{1}{0{,}0628 - 0{,}004}\biggr)^2 \biggl(0{,}0628 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}0628}} - 0{,}004 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}004}}\biggr)^2$$

$$+ 2\biggl(\frac{1}{0{,}0628 - 0{,}009}\biggr)^2 \biggl(0{,}0628 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}0628}} - 0{,}009 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}009}}\biggr)^2$$

$$- 2\biggl(\frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}026} + \frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}028}\biggr) \biggl(\frac{1}{0{,}0628 - 0{,}004}\biggr)$$

$$\cdot\left(0{,}0628 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}0628}} - 0{,}004 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}004}}\right)$$

$$- 2\left(\frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}026} + \frac{0{,}0628}{0{,}0628 + 0{,}028}\right)\cdot\left(\frac{1}{0{,}0628 - 0{,}009}\right)$$

$$\left.\left.\cdot\left(0{,}0628 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}0628}} - 0{,}009 \cdot e^{-\frac{0{,}105}{0{,}009}}\right)\right] + 0{,}0628\right\}$$

$$= \frac{\left(98\,000 \cdot \sqrt{2}\right)^2}{4\,000} \cdot \frac{0{,}0628}{2} \cdot 0{,}6898 = \underline{\underline{104 \text{ kW}}} \qquad (17)$$

Entsprechend den Spannungseinbrüchen, die nicht unendliche Steilheit besitzen, wird die tatsächliche Verlustleistung nach Formel (17) von 104 kW etwas kleiner (17%) als die von 126 kW (Formel 16) bei unendlicher Steilheit. Man sieht, daß die Näherungsrechnung nicht allzu große Abweichungen ergibt.

Diese Leistungsverluste gelten, wie in der Ableitung angenommen ist, für einen Steuerwinkel $\underline{\alpha = 90^\circ}$. Bei diesem treten, wie die Bilder 1 und 2 zeigten, wegen der maximalen Spannungssprünge die größten Verluste auf. Nach diesen Werten ist also der Widerstand des Dämpfungskreises zu dimensionieren. Für die tatsächlich im Betriebe bei kleinerem Steuerwinkel auftretenden Verluste gilt die im nächsten Abschnitt 5 angestellte Überlegung.

## <u>5. Praktische Werte der Verlustrechnung bei kleinen Steuerwinkeln.</u>

Die Höhe der Spannungseinbrüche in Bild 1 und 2 ändert sich mit $\sin\alpha$ bei Änderung der Aussteuerung. Der 50-periodige Anteil der Verluste in Gleichung 12d) bleibt der gleiche, während sich der Verlustanteil der 4 Spannungseinbrüche mit $\sin^2\alpha$ ändern wird, so daß für variables $\alpha$ Gleichung 12d) übergeht in:

$$P = \frac{(U\sqrt{2})^2}{R} \cdot \frac{\varsigma}{2}\left[\sin^2\alpha \cdot \frac{3}{\pi}\left(1 - e^{-\frac{\beta}{\varsigma}}\right) + \varsigma\right]$$

wobei für den Winkel $\beta$ der Überlappungswinkel u aus Tabelle 2 eingesetzt wird. Dann ergibt sich für die Verlustleistung P einer Phase die folgende Tabelle 3 in Abhängigkeit vom Steuerwinkel $\alpha$ :

Tabelle 3:

Verlustleistung P einer Phase in Abhängigkeit von dem Steuerwinkel $\alpha$ (Bild 14)

| $\alpha$ ° | P kW |
|---|---|
| 0 | 9,5 |
| 30 | 35,9 |
| 45 | 55,2 |
| 60 | 70,5 |
| 90 | 85,5 |

Wie der Vergleich für den Wert der Verlustleistung bei $\alpha = 90^{0}$ mit den Gleichungen 16) und 17) zeigt, liegen die Werte etwas niedriger als dort gerechnet, doch geben sie einen guten Überblick über die auftretende Größenordnung.

Im praktischen Betrieb wird man mit einem Steuerwinkel von etwa $\alpha = 30^{0}$ rechnen, wobei nach Tabelle 3 die Verluste für alle 3 Phasen 108 kW betragen.

Bei einer Leistung von 30 MW sind dieses 0,36%, um welche der Wirkungsgrad sich verschlechtert. Sollte man vorsichtshalber wegen der Schwierigkeit der Berechnung noch einige Zehntel Prozent mehr absetzen wollen, so bewegen sich die Verluste der RC-Dämpfungskreise in erträglichen Grenzen.

Zur Bestätigung der rechnerischen Ergebnisse wurde ein Versuch an der Modellanlage bei Nennstrom I = 1,5 A= unternommen. Die Leistung wurde mit Hilfe eines Thermostrommessers ermittelt, der im RC-Dämpfungskreis eingeschaltet wurde. Die Leistung, die sich aus diesem Versuch ergab, stimmte in den Grenzen der Meßgenauigkeit mit den gerechneten Werten gut überein.

6. Berechnung der Kondensatorspannung und der Leistung im Widerstand des Dämpfungsgliedes, für den Spezialfall $\Gamma = \gamma = \Delta = \lambda = 0$, d.h. für Rechteck-Einbrüche. *)

A. Die zu berechnende Kondensatorspannung und Leistung ergibt sich aus der Lösung der Differentialgleichung

$$v(x) + \varrho \frac{dv}{dx} = e(x), \qquad (18)$$

wo v die Spannung am Kondensator und

$\varrho^{\circ}$ die Zeitkonstante im Winkelmaß bedeutet.

Bild 15 stellt die Funktion e(x) (Transformatorspannung) dar, und zwar ist

$$e(x) = \sin x \quad \text{für } x = 0 \quad \text{bis } x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$$

$$e(x) = 0 \quad \text{für } x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}$$

$$e(x) = \sin x \quad \text{für } x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{2\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$$

$$e(x) = 0 \quad \text{für } x = \frac{2\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{2\pi}{3} + \frac{\beta}{2}$$

$$e(x) = \sin x \quad \text{für } x = \frac{2\pi}{3} + \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \pi$$

Entsprechend wiederholt sich der Vorgang, wie Bild 15 zeigt, auf dem negativen Teil der Funktion e(x) bis $x = 2\pi$

Die Einbrüche befinden sich an den Stellen

$$x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}; \quad x = \frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}; \quad x = \frac{4}{3}\pi - \frac{\beta}{2}; \quad x = \frac{5}{3}\pi - \frac{\beta}{2}$$

usw..

Die Breite des Einbruchs ist $\beta$

*) Dieser Abschnitt 6 wurde von Herrn Parpart verfaßt.

Die Differentialgleichung (18)

$$v(x) + \varrho \frac{dv}{dx} = s(x)$$ hat die Lösung

$$v = e^{-\frac{1}{\varrho}x} \cdot \left(K + \frac{1}{\varrho}\int s(x)\, e^{\frac{1}{\varrho}x}\, dx\right) \qquad (19)$$

Für die Intervalle, in denen $s(x) = \sin x$ ist, erhalten wir als Lösung

$$v = K\, e^{-\frac{1}{\varrho}x} + \frac{\sin x - \varrho \cos x}{1 + \varrho^2}, \qquad (20)$$

während sich für $s(x) = 0$ als Lösung

$$v = K \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}x} \qquad (20)$$

ergibt, wobei die Konstanten K für jedes Intervall verschieden sind und noch bestimmt werden müssen.

Wir bezeichnen die für die jeweiligen Intervalle zugehörigen Konstanten K mit $K_1$, $K_2$, $K_3 \ldots K_9$ und bestimmen $K_1 \ldots K_9$

so daß

1. die Kondensatorspannung $v(x)$ für das Intervall $0 \ldots 2\pi$ eine stetige Funktion wird
2. die Kondensatorspannung $v(x)$ nach Ablauf der Periode immer wieder denselben Wert annimmt.

Es gelten also folgende Gleichungen für v (Gln.20 und 21)

$$v_1 = K_1 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}x} + \frac{\sin x - \varrho \cos x}{1 + \varrho^2} \quad \text{für } x = 0 \text{ bis } x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \qquad (22)$$

$$v_2 = K_2 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}x} \qquad x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \text{ bis } \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2} \qquad (23)$$

$$v_3 = K_3 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}x} + \frac{\sin x - \rho\cos x}{1+\rho^2} \quad \text{für } = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2} \qquad (24)$$

$$\vdots$$

$$v_9 = K_9 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}x} + \frac{\sin x - \rho\cos x}{1+\rho^2} \quad x = \frac{5}{3}\pi + \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = 2\pi \qquad (25)$$

Am Ende des 1.Intervalls ist

$$v_1 = K_1 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}x} + \frac{\sin x - \rho\cos x}{1+\rho^2} \quad \text{für } x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$$

Am Anfang des 2.Intervalls ist

$$v_2 = K_2 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}x} \quad \text{für } x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$$

Da am Übergang vom 1. zum 2.Intervall die Forderung der Stetigkeit erfüllt sein muß, so muß

$v_1 = v_2$ sein an der Stelle $x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$;

ebenso muß $v_2 = v_3$ an der Stelle $x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}$

$v_3 = v_4$ an der Stelle $x = \frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}$

$\vdots$

$v_8 = v_9$ an der Stelle $x = \frac{5}{3}\pi + \frac{\beta}{2}$ sein (s.Fig. 15)

Für $v_1 = v_2$ am Intervall-Übergang ergibt sich die Beziehung zwischen $K_1$ und $K_2$:

$$K_2 = K_1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) - \rho\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}{1+\rho^2} \cdot e^{\frac{1}{\rho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}$$

Man erhält auf diese Weise für die übrigen Konstanten:

$$K_3 = K_2 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right) - \rho\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \rho^2} \cdot e^{\frac{1}{\rho}\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}$$

oder

$$K_3 = K_1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) - \rho\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \rho^2} \cdot e^{\frac{1}{\rho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}$$

$$- \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right) - \rho\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \rho^2} \cdot e^{\frac{1}{\rho}\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}$$

$$K_4 = K_1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) - \rho\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \rho^2} \cdot e^{\frac{1}{\rho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}$$

$$- \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right) - \rho\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \rho^2} \cdot e^{\frac{1}{\rho}\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}$$

$$- \frac{\sin\left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}\right) - \rho\cos\left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \rho^2} \cdot e^{\frac{1}{\rho}\left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}\right)}$$

Der Aufbau der Konstanten $K_5 \ldots K_9$ ist nun ohne Schwierigkeit zu erkennen. (Das Vorzeichen ist alternierend).

Es ist zunächst nicht zweckmäßig, $K_1$, $K_2 \ldots K_9$ auf diese Weise zu bestimmen, da die hier auftretenden Funktionen $e^{\frac{1}{\rho}x}$ mit steigendem Argument stark anwachsen und daher die numerische Berechnung erschweren; außerdem können die Konstanten selbst trotz des alternierenden Vorzeichens auch sehr hohe Werte annehmen. Wir bestimmen daher die Konstanten K so, daß sie für das betreffende Intervall den Anfangswert v des Intervalls annehmen. Es war

$$v_2 = K_2 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}x} \qquad x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \text{ bis } \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}$$

Man kann auch schreiben:

$$v_2 = K_2 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)} \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left[x - \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)\right]}$$

$$v_2 = \bar{K}_2 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left[x - \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)\right]}$$

$$\text{also: } K_2 = \bar{K}_2 \cdot e^{+\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}$$

$$x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2} .$$

Da für $x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$ $v_2 = \bar{K}_2 = (v_1)_{\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}$ ist, so ergibt sich

$$v_2 = (v_1)_{\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)} \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left[x - \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)\right]} \quad x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}$$

Durch dieselben Überlegungen erhält man dann:

$$v_3 = \left[(v_2)_{\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)} - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right) - \varrho\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \varrho^2}\right] \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left[x - \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)\right]}$$

$$+ \frac{\sin x - \varrho\cos x}{1 + \varrho^2} ,$$

$$x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2} \qquad (26)$$

$$v_4 = (v_3)_{\left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}\right)} \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left[x - \left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}\right)\right]} ; x = \frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2} \text{ bis } x = \frac{2}{3}\pi + \frac{\beta}{2}$$

$$v_5 = \left[(v_4)_{\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)} - \frac{\sin\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)\cdot\rho\cos\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\rho^2}\right]\cdot e^{-\frac{1}{\rho}\left[x-\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right]}$$

$$+\frac{\sin x-\rho\cos x}{1+\rho^2};\quad x=\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\ \text{bis}\ x=\frac{4}{3}\pi-\frac{\beta}{2}$$

$$v_6 = (v_5)_{\left(\frac{4}{3}\pi-\frac{\beta}{2}\right)}\cdot e^{-\frac{1}{\rho}\left[x-\left(\frac{4}{3}\pi-\frac{\beta}{2}\right)\right]};\quad x=\frac{4}{3}\pi-\frac{\beta}{2}\ \text{bis}\ x=\frac{4}{3}\pi+\frac{\beta}{2}$$

$$v_9 = \left[(v_8)_{\left(\frac{5}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)} - \frac{\sin\left(\frac{5}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)-\rho\cos\left(\frac{5}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\rho^2}\right]\cdot e^{-\frac{1}{\rho}\left[x-\left(\frac{5}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)\right]}$$

$$+\frac{\sin x-\rho\cos x}{1+\rho^2}.$$

$$x=\frac{5}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\ \text{bis}\ x=2\pi$$

Man erkennt, daß man $v_6$ aus $v_2$, $v_7$ aus $v_3$, $v_8$ aus $v_4$ und $v_9$ aus $v_5$ herleiten kann, indem man das Argument von $v_2$, $v_3$, $v_4$ und $v_5$ um $\pi$ verschiebt und die Werte von $v_2 \ldots v_5$ mit $-1$ multipliziert. Es erübrigt sich also, $v_6 \ldots v_9$ zu berechnen.

Es ist jetzt nur noch die Konstante $K_1$ zu bestimmen, die die Berechnung von v einleitet. Indem man formal $v_2$ in $v_1$, $v_3$ in $v_2$ usw. einsetzt, ergibt sich mit der Forderung 2) auf S. 19 eine Beziehung, die $K_1$ enthält. Setzt man zur Abkürzung

$$A_1 = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)-\rho\cos\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}{1+\rho^2};\quad A_2 = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)+\rho\cos\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}{1+\rho^2}$$

$$B_1 = -\frac{\sin\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)-\rho\cos\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\rho^2};\quad B_2 = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)+\rho\cos\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\rho^2}$$

so erhält man nach einigen Umformungen

$$X_1 = \frac{\left(A_1 - A_2 \cdot e^{\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} + \beta\right)}\right)\left[B_1 - B_2 \cdot e^{\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \beta\right)}\right] \cdot e^{\frac{1}{\varrho}\beta}}{-\left[e^{\frac{1}{\varrho}\left(\frac{2}{3}\pi + \frac{\beta}{2}\right)} + e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}\right]} \qquad (28)$$

Mit Hilfe der Beziehungen (27) und (28) lassen sich für jedes beliebige $\varrho$ und $\beta$ $K_1$ und durch die Beziehungen (26) die Kondensatorspannungen v berechnen.

## B. Berechnung der Leistung.

Die Leistung ist gegeben durch den Ausdruck

$$L = \int \left(\varrho \frac{dv}{dx}\right)^2 dx \qquad (29)$$

Nach Gl.(18) ist $\varrho \frac{dv}{dx} = e\,(x) - v\,(x)$

Somit wird

$$\int \left(\varrho \frac{dv}{dx}\right)^2 dx = \int \left[e\,(x) - v(x)\right]^2 dx$$

Die Funktion $e(x)$ ist auf Seite 18 definiert. Für v benutzen wir die in den Gleichungen (26) entwickelten Formeln.

Für das Intervall $x = 0$ bis $x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$ ergibt sich der Ausdruck

$$\int_0^{\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}} \left(\varrho \frac{dv}{dx}\right)^2 dx = \frac{1}{2} \frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) + \frac{1}{4} \frac{\varrho^2\left[1-\varrho^2\right]}{\left[1+\varrho^2\right]^2} \cdot$$

$$\cdot \sin 2\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) + \frac{\varrho^3}{\left[1+\varrho^2\right]^2} \sin^2\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) - \frac{1}{2} K_1 \varrho^2 \left[e^{-\frac{2}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)} - 1\right]$$

$$+ 2 K_1 \frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left[\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)} - 1\right]; \qquad (30)$$

Für das 2.Intervall: $x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$ bis $x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}$

erhalten wir

$$\int_{\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}}^{\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}} \left(\varrho \frac{dv_2}{dx}\right)^2 dx = -\frac{1}{2}\varrho\left[(v_1)_{\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}\right]^2\left(e^{-\frac{2}{\varrho}\beta}-1\right) \qquad (31)$$

Für $(v_1)$ an der Stelle $\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$ kann auch $\overline{K}_2$ gesetzt werden.

Es wird für die nächsten Intervalle:

$$\begin{aligned}\int_{\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}}^{\frac{2}{3}\pi-\frac{\beta}{2}} \left(\varrho \frac{dv_3}{dx}\right)^2 dx = {} & \frac{1}{2}\frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left(\frac{\pi}{3}-\beta\right) - \frac{1}{2}\frac{\varrho^2(1-\varrho^2)}{(1+\varrho^2)^2}\sin 2\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right) \qquad (32)\\ & -\frac{1}{2}\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)-\varrho\cos\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\varrho^2} - (v_2)_{\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)}\right]^2 \varrho\cdot\left[e^{-\frac{2}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\beta\right)}-1\right]\\ & +2\frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)-\varrho\cos\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\varrho^2} - (v_2)_{\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{3}\right)}\right]\cos\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)\cdot\\ & \cdot\left[e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\beta\right)}+1\right];\end{aligned}$$

$$\int_{\frac{2}{3}\pi-\frac{\beta}{2}}^{\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}} \left(\varrho \frac{dv_4}{dx}\right)^2 dx = -\frac{1}{2}\varrho\left[(v_3)_{\left(\frac{2}{3}\pi-\frac{\beta}{2}\right)}\right]^2\cdot\left(e^{-\frac{2}{\varrho}\beta}-1\right) \qquad (33)$$

$$\begin{aligned}\int_{\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}}^{\pi} \left(\varrho \frac{dv_5}{dx}\right)^2 dx = {} & \frac{1}{2}\frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right) + \frac{1}{4}\frac{\varrho^2(1+\varrho^2)}{(1+\varrho^2)^2}\sin 2\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)\\ & -\frac{\varrho^2}{(1+\varrho^2)^2}\sin^2\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right) \qquad (34)\end{aligned}$$

$$-\frac{1}{2}\varrho\left[\frac{\sin\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)-\varrho\cos\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\varrho^2}-(v_4)_{\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)}\right]^2\cdot\left[e^{-\frac{2}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}-1\right]$$

$$-2\frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left[\frac{\sin\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)-\varrho\cos\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)}{1+\varrho^2}-(v_4)_{\left(\frac{2}{3}\pi+\frac{\beta}{2}\right)}\right]\cdot\left[\cos\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)-e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}\right]$$

Die Summierung der einzelnen Integrale ergibt die Gesamtleistung für das Intervall 0 bis $\pi$

Dividiert man noch durch $\pi$, so erhöht man nach Einführung der Konstanten $K_1$, $K_2$.. $K_5$ folgenden Ausdruck für den Mittelwert der Leistung, erstreckt über die Halbperiode:

Mittelwert der Leistung:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\left(\varrho\frac{dv}{dx}\right)^2 dx &= \frac{1}{2\pi}\frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}(\pi-2\beta)+\frac{1}{2\pi}\frac{\varrho^2(1-\varrho^2)}{(1+\varrho^2)^2}\sin\beta \\
&+\frac{2}{\pi}\frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left\{-K_1\left[1-\cos\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)\cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}\right]\right. \\
&+K_3\cos\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\beta}{2}\right)\cdot\left[1+e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}\right] \qquad (35) \\
&\left.-K_5\cdot\left[\cos\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)-e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\beta}{2}\right)}\right]\right\} \\
&+\frac{1}{2\pi}\varrho\left\{\left[K_1^2+K_5^2\right]\cdot\left[1-e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{2}{3}\pi-\beta\right)}\right]+\left[K_2^2+K_4^2\right]\cdot\left[1-e^{-\frac{2}{\varrho}\beta}\right]\right. \\
&\left.+K_3^2\cdot\left[1-e^{-\frac{2}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3}-\beta\right)}\right]\right\}
\end{aligned}$$

Für kleine Werte von $\varrho$ $\left(\varrho \ll \frac{\pi}{3}\right.$, also bis ungefähr $\left.10^\circ\right)$ kann man für die Leistung folgende Näherungsformel benutzen:

$$\frac{1}{\pi}\int_0^\pi \left(\varrho \frac{dv}{dx}\right)^2 dx \cong \frac{1}{2\pi}\frac{\varrho^2}{1+\varrho^2}\left[\pi - 2\beta + \left(\frac{4\cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\beta}}{1+\varrho^2} - 1\right)\sin\beta\right] \quad (36)$$

$$+ \frac{1}{\pi}\frac{\varrho}{1+\varrho^2}\left[\frac{3-\varrho^2}{2(1+\varrho^2)} - \sin^2\frac{\beta}{2}\right]\cdot\left(1-e^{-\frac{1}{\varrho}\beta}\right)$$

Folgende Tabelle 4 zeigt eine Gegenüberstellung der exakten und der angenäherten Formel für die Leistung, für $\varrho = 4^\circ$, $10^\circ$, $20^\circ$, $30^\circ$, wobei $\beta = \varrho$ gesetzt wird.

Tabelle 4:

| $\varrho = \beta$ | Exakte Formel (Gl. 35) | Näherungs-Formel (Gl. 36) | (Abschätzung) nach Gleichung 12d (Tabelle 1) |
|---|---|---|---|
| $4^\circ$ | 0,0233 | 0,0233 | 0,0235 |
| $10^\circ$ | 0,06235 | 0,0624 | 0,068 |
| $20^\circ$ | 0,11806 | 0,1240 | 0,166 |
| $30^\circ$ | 0,14188 | 0,1562 | 0,295 |

In Bild 16 werden die 3 Auswertungen der Leistungen zusammengestellt, die für Werte zwischen $\beta = \varrho = 0 \ldots 10^\circ$ gut übereinstimmen.

C. Zusammenfassung der entwickelten Formeln für die Spannung am Kondensator und für die Leistung, sowie Auswertungsergebnisse für $\varrho = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$; $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$.

Für die praktische numerische Auswertung der Kondensatorspannung und der Leistung für ein gegebenes $\varrho$ und $\beta$ werden zweckmäßig zunächst die in (27) dargestellten Ausdrücke berechnet:



Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010003-4

$$A_1 = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) - \varrho\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \varrho^2}\,; \quad A_2 = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right) + \varrho\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \varrho^2}$$

$$B_1 = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right) - \varrho\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \varrho^2}\,; \quad B_2 = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right) + \varrho\cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)}{1 + \varrho^2} \tag{27}$$

Mit den Werten $A_1$, $A_2$, $B_1$, $B_2$ berechnet man dann

$$K_1 = \frac{A_1 - A_2 \cdot e^{\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} + \beta\right)} - \left[B_1 - B_2 \cdot e^{\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \beta\right)}\right] \cdot e^{\frac{1}{\varrho}\beta}}{-\left[e^{\frac{1}{\varrho}\left(\frac{2}{3}\pi + \frac{\beta}{2}\right)} + e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)}\right]} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
K_2 &= A_1 + K_1 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)} \\
K_3 &= B_1 - K_2 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\beta} \\
K_4 &= B_2 - K_3 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left(\frac{\pi}{3} - \beta\right)} \\
K_5 &= A_2 - K_4 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\beta}
\end{aligned} \tag{28a}$$

Es ergeben sich mit $K_1 \ldots K_5$ die Kondensatorspannungen:

$$v_1 = \frac{\sin x - \varrho\cos x}{1 + \varrho^2} + K_1 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}x}\,; \quad x = 0 \ldots \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}$$

$$v_2 = K_2 \cdot e^{-\frac{1}{\varrho}\left[x - \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2}\right)\right]}\,; \quad x = \frac{\pi}{3} - \frac{\beta}{2} \ldots\ldots \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}$$

$$v_3 = \frac{\sin x - \rho \cos x}{1 + \rho^2} - K_3 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}\left[x - \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2}\right)\right]};$$

$$x = \frac{\pi}{3} + \frac{\beta}{2} \;\ldots\; \frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2} \qquad (26a)$$

$$v_4 = K_4 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}\left[x - \left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2}\right)\right]}; \quad x = \frac{2}{3}\pi - \frac{\beta}{2} \;\ldots\; \frac{2}{3}\pi + \frac{\beta}{2}$$

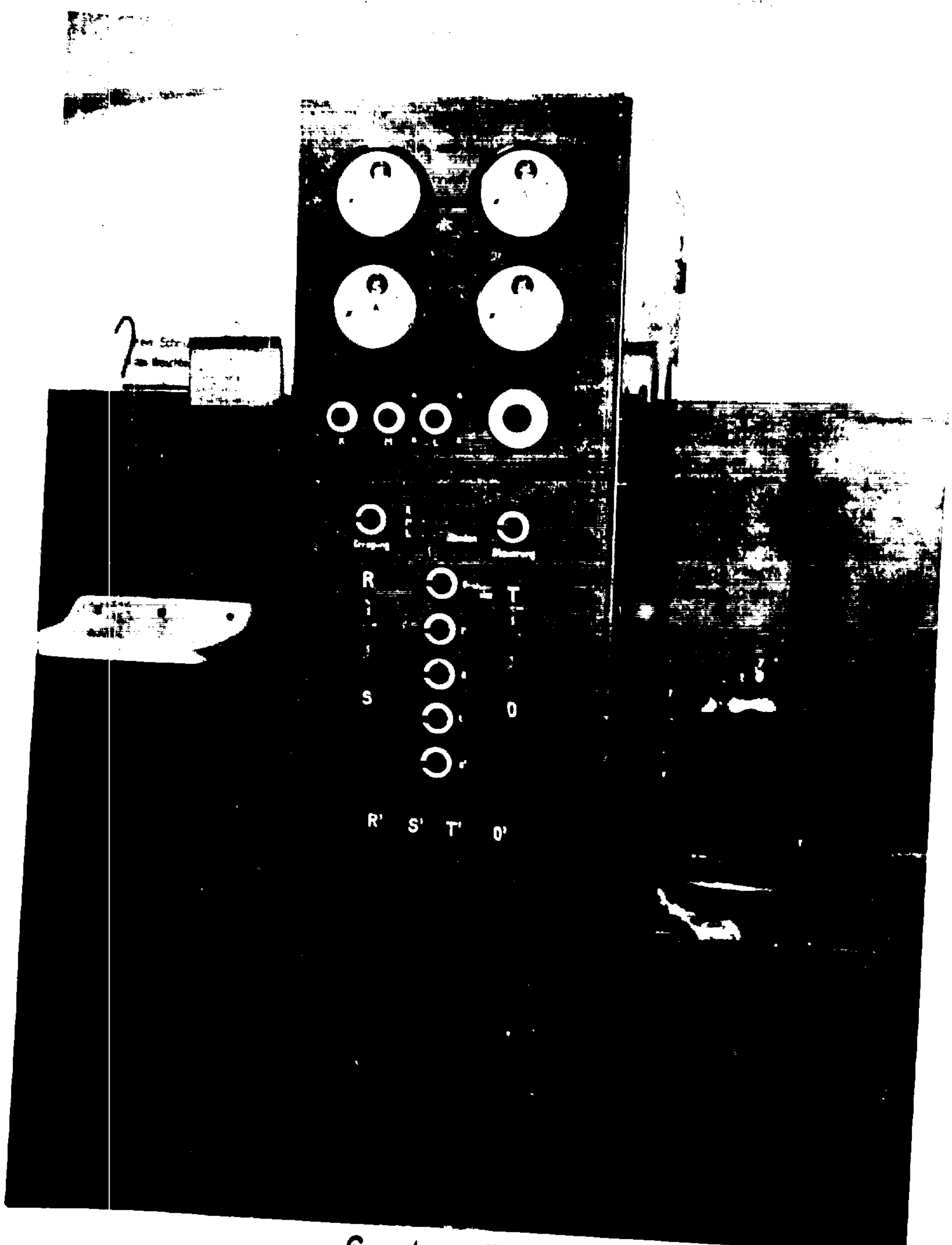
$$v_5 = \frac{\sin x - \rho \cos x}{1 + \rho^2} - K_5 \cdot e^{-\frac{1}{\rho}\left[x - \left(\frac{2}{3}\pi + \frac{\beta}{2}\right)\right]}; \quad x = \frac{2}{3}\pi + \frac{\beta}{2} \;\ldots\; \pi$$

Die Ausdrücke für die Leistung sind in ihrer endgültigen Form bereits in den Gleichungen (35) und (36) dargestellt.

Anschließend sind Tabellen für die Kondensatorspannung zusammengestellt und in Bild 17 ist die Kondensatorspannung für den Fall $\rho = \beta = 30^0$ aufgetragen.

**Kondensatorspannung v**

| $X^{0}$ | $\varrho = 10°$ | | | $\varrho = 20°$ | | | $\varrho = 30°$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\beta = 10°$ | $\beta = 20°$ | $\beta = 30°$ | $\beta = 10°$ | $\beta = 20°$ | $\beta = 30°$ | $\beta = 10°$ | $\beta = 20°$ | $\beta = 30°$ |
| 0 | $\bar{0}$,16715 | $\bar{0}$,16450 | $\bar{0}$,16094 | $\bar{0}$,28840 | $\bar{0}$,26494 | $\bar{0}$,24007 | $\bar{0}$,36664 | $\bar{0}$,32202 | $\bar{0}$,27682 |
| 5 | $\bar{0}$,08280 | $\bar{0}$,08120 | $\bar{0}$,07903 | $\bar{0}$,21456 | $\bar{0}$,19629 | $\bar{0}$,17692 | $\bar{0}$,30347 | $\bar{0}$,26571 | $\bar{0}$,22744 |
| 10 | 0,00253 | 0,00351 | 0,00482 | $\bar{0}$,13784 | $\bar{0}$,12361 | $\bar{0}$,10852 | $\bar{0}$,23667 | $\bar{0}$,20470 | $\bar{0}$,17231 |
| 15 | 0,08806 | 0,08865 | 0,08945 | 0,06693 | $\bar{0}$,05585 | $\bar{0}$,04410 | $\bar{0}$,16694 | $\bar{0}$,13988 | $\bar{0}$,11246 |
| 20 | 0,17305 | 0,17341 | 0,17389 | 0,02085 | 0,02949 | 0,03864 | $\bar{0}$,09498 | $\bar{0}$,07208 | $\bar{0}$,04867 |
| 25 | 0,25680 | 0,25702 | 0,25731 | 0,10126 | 0,10798 | 0,11511 | $\bar{0}$,02150 | $\bar{0}$,02110 | 0,01754 |
| 30 | 0,33865 | 0,33878 | 0,33896 | 0,18130 | 0,18654 | 0,19209 | 0,05283 | 0,06924 | 0,08587 |
| 35 | 0,41795 | 0,41800 | 0,41813 | 0,26035 | 0,26443 | 0,26875 | 0,12734 | 0,14123 | 0,15531 |
| 40 | 0,49408 | 0,49413 | 0,49419 | 0,33770 | 0,34087 | 0,34424 | 0,20136 | 0,21318 | 0,22504 |
| 45 | 0,56646 | 0,56649 | 0,56653 | 0,41269 | 0,41516 | 0,41778 | 0,27427 | 0,28422 | 0,29431 |
| 50 | 0,63454 | 0,63456 | 0,34362 | 0,48470 | 0,48663 | 0,32537 | 0,34542 | 0,35387 | 0,24913 |
| 55 | 0,69780 | 0,38488 | 0,20842 | 0,55317 | 0,37899 | 0,25340 | 0,41428 | 0,29954 | 0,21088 |
| 60 | 0,42324 | 0,23344 | 0,12641 | 0,43081 | 0,29516 | 0,19735 | 0,35068 | 0,25356 | 0,17851 |
| 65 | 0,25671 | 0,14159 | 0,07667 | 0,33551 | 0,22987 | 0,15369 | 0,29684 | 0,21463 | 0,15110 |
| 70 | 0,51965 | 0,08588 | 0,04650 | 0,46575 | 0,17902 | 0,11970 | 0,39513 | 0,18168 | 0,12791 |
| 75 | 0,69075 | 0,42765 | 0,02821 | 0,57374 | 0,35044 | 0,09322 | 0,47920 | 0,30021 | 0,10827 |
| 80 | 0,80329 | 0,64372 | 0,40144 | 0,66280 | 0,48890 | 0,28857 | 0,55550 | 0,40400 | 0,24152 |
| 85 | 0,87738 | 0,78060 | 0,63365 | 0,73548 | 0,60004 | 0,44403 | 0,62241 | 0,49416 | 0,35662 |
| 90 | 0,92519 | 0,86649 | 0,77736 | 0,79373 | 0,68825 | 0,56675 | 0,68019 | 0,57163 | 0,45521 |
| 95 | 0,95407 | 0,91846 | 0,86440 | 0,83906 | 0,75691 | 0,66228 | 0,72908 | 0,63719 | 0,53864 |
| 100 | 0,96846 | 0,94687 | 0,91408 | 0,86829 | 0,80432 | 0,73062 | 0,76929 | 0,69150 | 0,60808 |
| 105 | 0,98123 | 0,96813 | 0,94824 | 0,89542 | 0,84559 | 0,78820 | 0,80098 | 0,75513 | 0,66452 |
| 110 | 0,96372 | 0,95576 | 0,57514 | 0,90813 | 0,86931 | 0,61385 | 0,82432 | 0,76859 | 0,56251 |
| 115 | 0,84738 | 0,57971 | 0,34884 | 0,91139 | 0,67702 | 0,47807 | 0,83949 | 0,65060 | 0,47615 |
| 120 | 0,57462 | 0,35161 | 0,21158 | 0,70979 | 0,52726 | 0,37232 | 0,71061 | 0,55072 | 0,40305 |
| 125 | 0,34852 | 0,21326 | 0,12833 | 0,55279 | 0,41063 | 0,28996 | 0,60152 | 0,46617 | 0,34118 |
| 130 | 0,52258 | 0,12935 | 0,07784 | 0,50570 | 0,31980 | 0,22582 | 0,63080 | 0,39461 | 0,28880 |
| 135 | 0,60600 | 0,36750 | 0,04721 | 0,63448 | 0,41182 | 0,17587 | 0,64700 | 0,44707 | 0,24446 |
| 140 | 0,63225 | 0,48759 | 0,29332 | 0,64323 | 0,46983 | 0,28607 | 0,65122 | 0,48198 | 0,31048 |
| 145 | 0,62180 | 0,53406 | 0,41623 | 0,63525 | 0,50020 | 0,35708 | 0,64452 | 0,50127 | 0,35609 |
| 150 | 0,58728 | 0,53406 | 0,46260 | 0,61320 | 0,50803 | 0,39657 | 0,62788 | 0,50662 | 0,38375 |
| 155 | 0,53657 | 0,50429 | 0,46094 | 0,57931 | 0,49740 | 0,41060 | 0,60219 | 0,49954 | 0,39552 |
| 160 | 0,47465 | 0,45508 | 0,42879 | 0,53542 | 0,47163 | 0,40403 | 0,56830 | 0,48141 | 0,39336 |
| 165 | 0,40481 | 0,39294 | 0,39699 | 0,48310 | 0,43342 | 0,38077 | 0,52703 | 0,45348 | 0,37894 |
| 170 | 0,32921 | 0,32201 | 0,31234 | 0,42371 | 0,38501 | 0,34401 | 0,47915 | 0,41690 | 0,35380 |
| 175 | 0,24965 | 0,24528 | 0,23941 | 0,35845 | 0,32832 | 0,29638 | 0,42544 | 0,37274 | 0,31934 |
| 180 | 0,16715 | 0,16450 | 0,16094 | 0,28840 | 0,26494 | 0,24007 | 0,36664 | 0,32202 | 0,27682 |

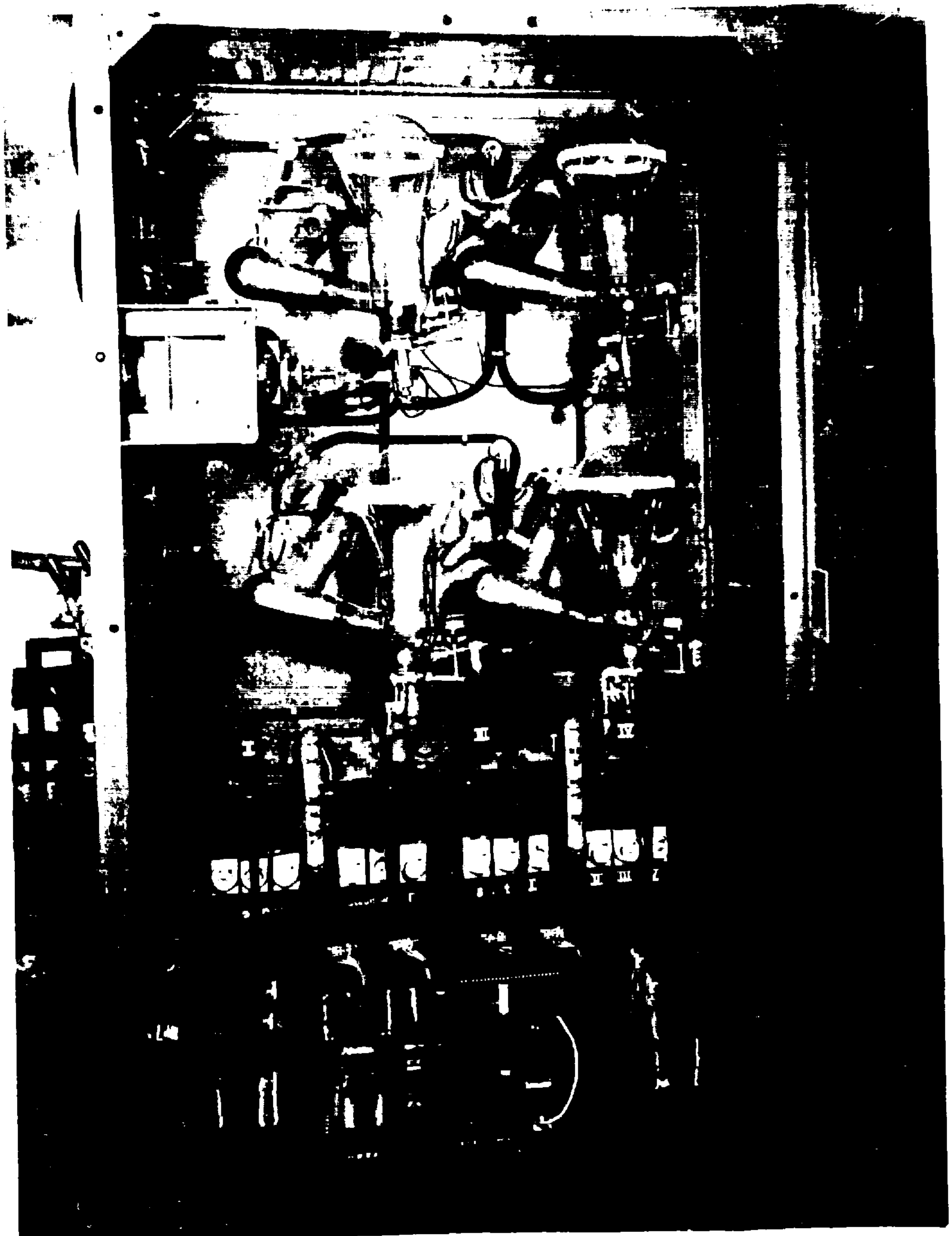



Synchronröhrenschalter

25X1A

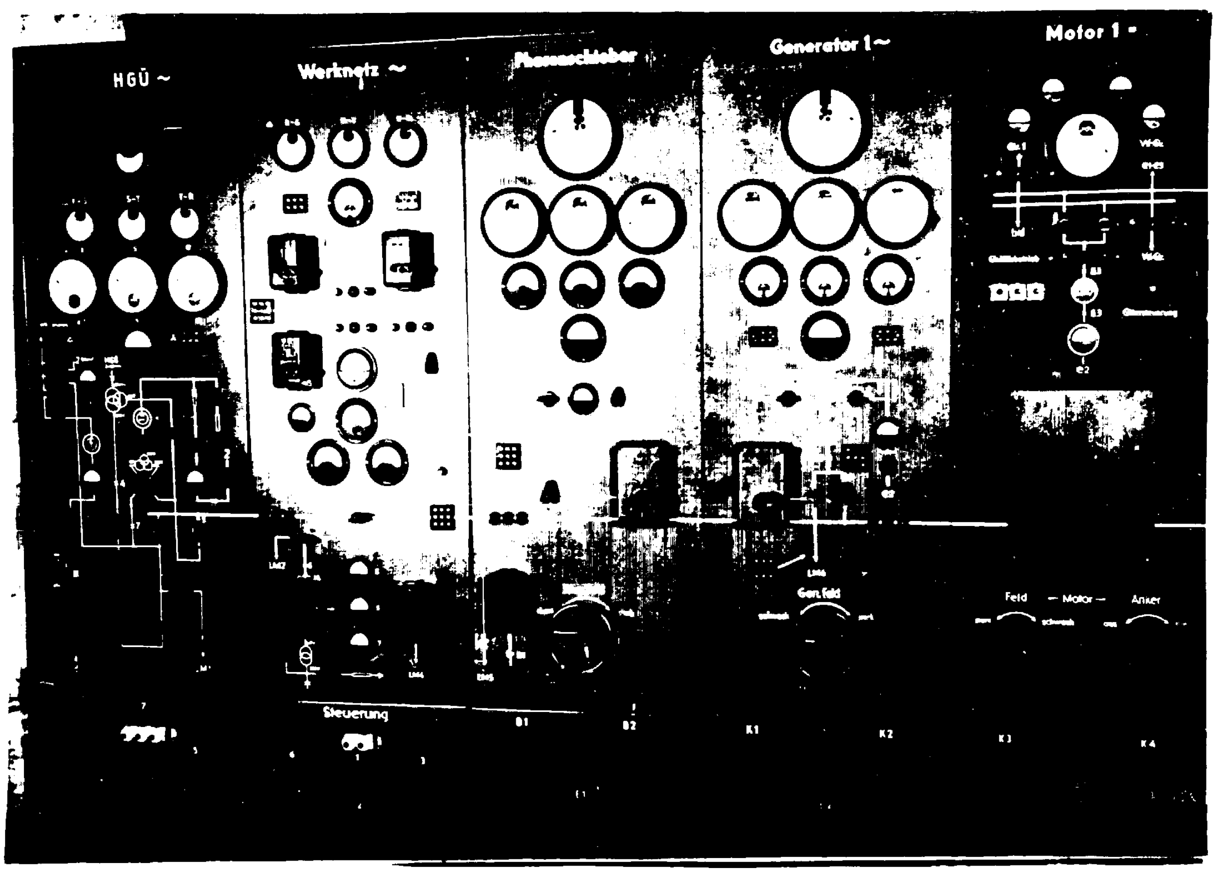
[redacted]

Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010003-4



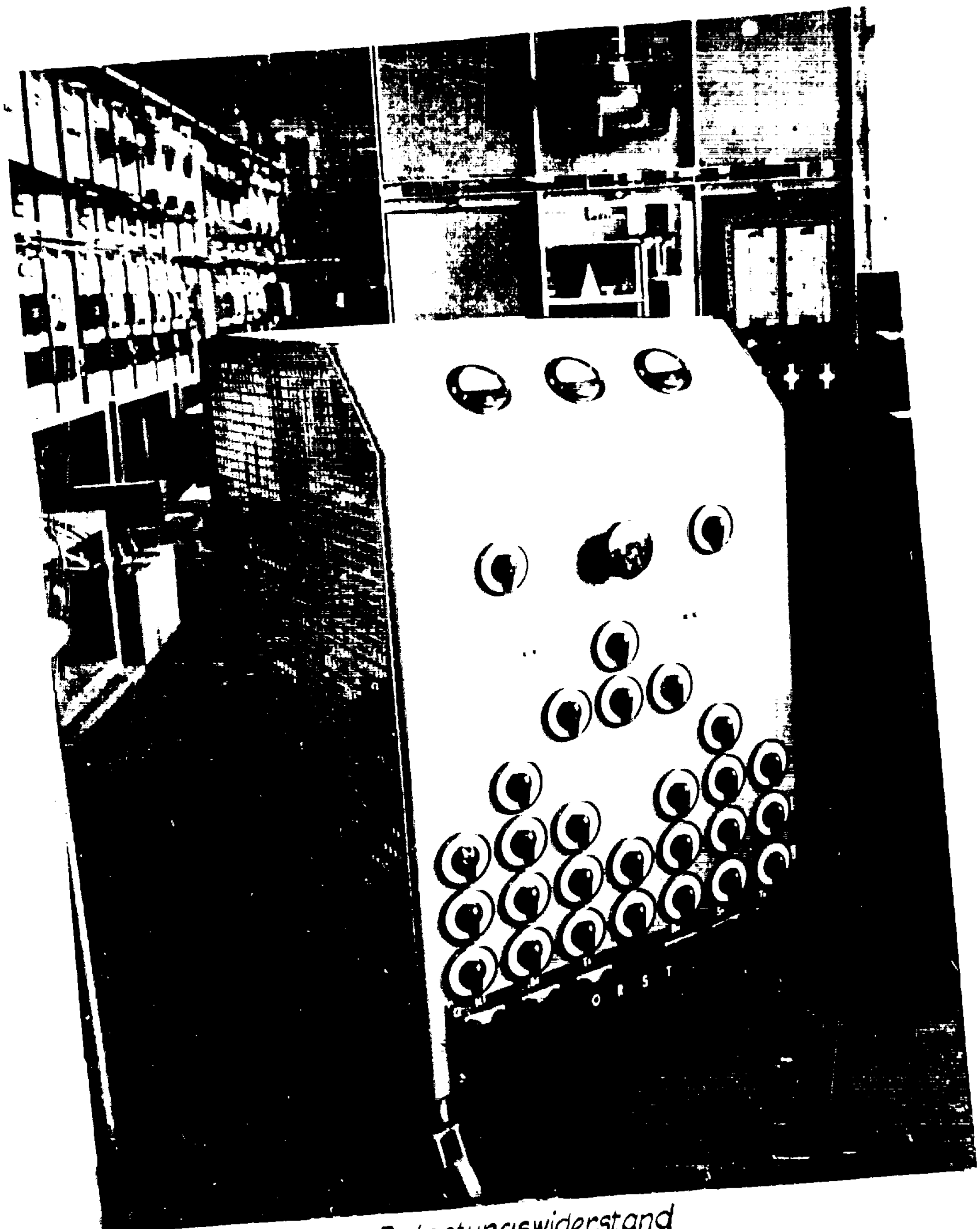
*Synchronröhrenschalter*

Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010003-4



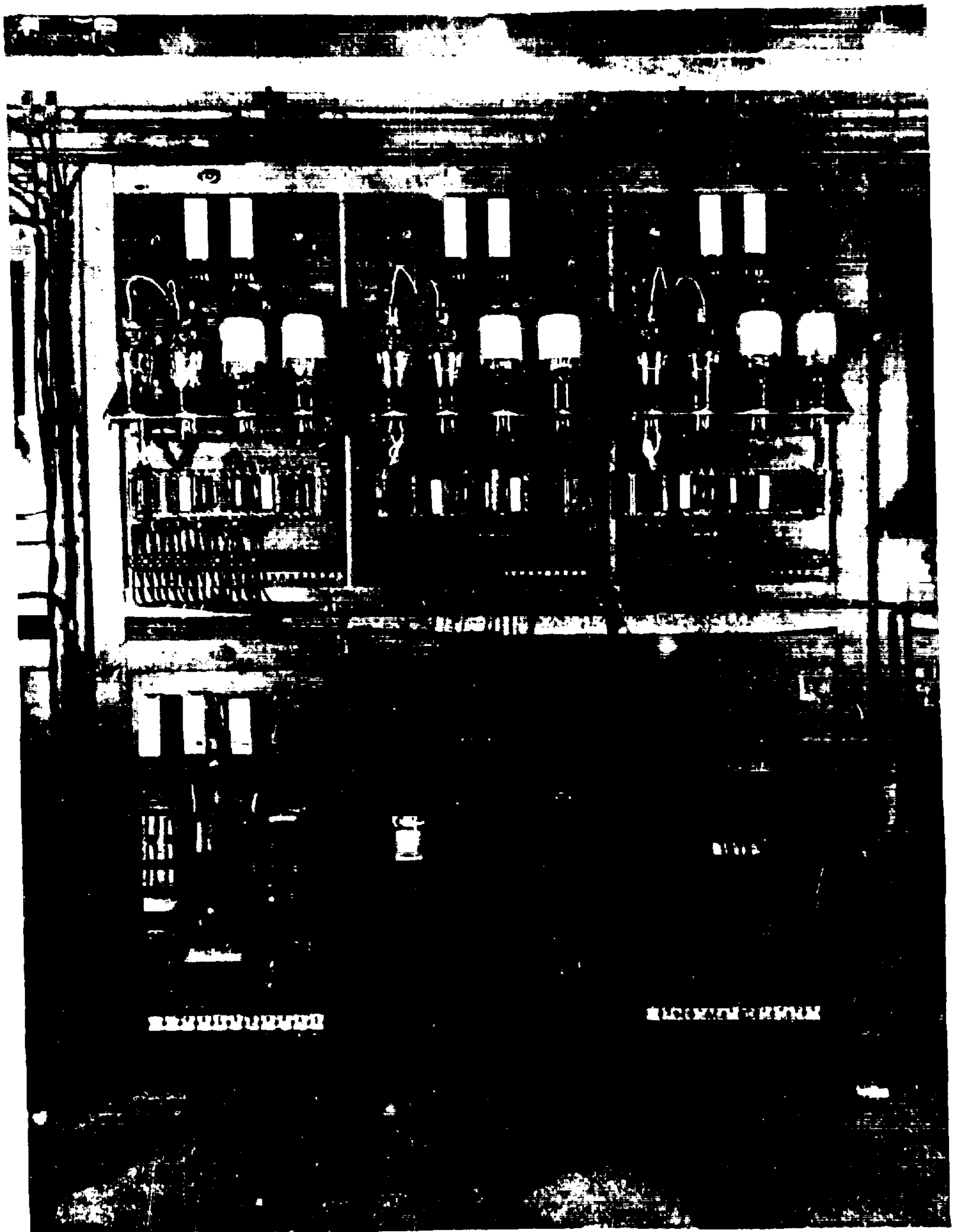

Schalttafeln zum Wechselrichternetz


Schalttafeln zum Wechselrichternetz



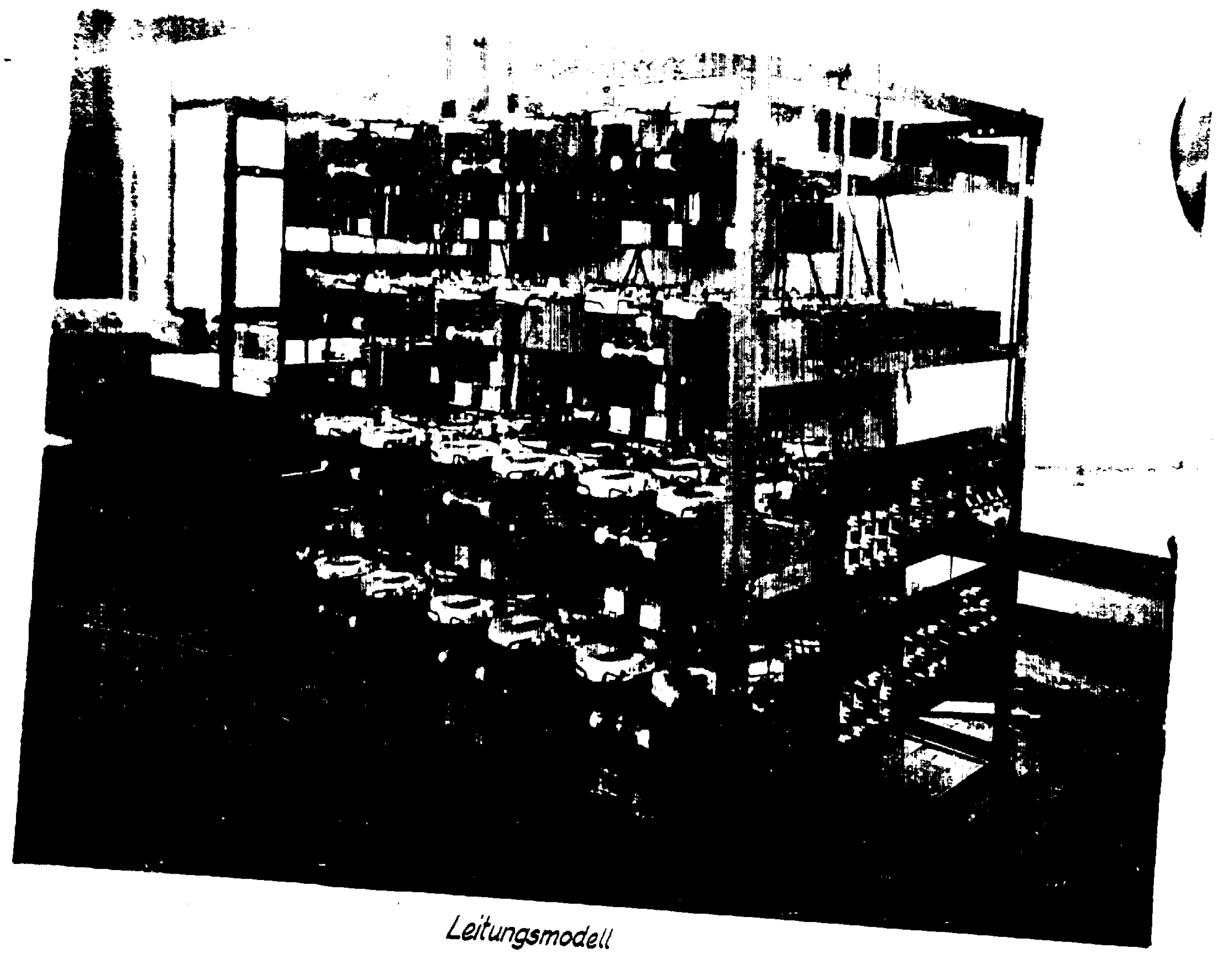
Belastungswiderstand

Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010003-4



Brenndauerüberwachung

Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010003-4



*Leitungsmodell*

SECRET

Approved For Release 2001/12/05 : CIA-RDP83-00415R004800010003-4



Schalttafeln zum Wechselrichternetz